

学校编码: 10384

分类号\_\_密级\_\_

学 号: 20051302425

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

无下采样 Contourlet 变换及其在图像处理中的  
应用研究

Research of Nonsubsampled Contourlet Transform and its  
Application on Image Processing

连学强

指导教师姓名: 丁兴号 副教授

专 业 名 称: 信号与信息处理

论文提交日期: 2008 年 5 月

论文答辩时间: 2008 年 5 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2008 年 5 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在          年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：                      日期：          年    月    日

导师签名：                      日期：          年    月    日

## 摘要

Contourlet 变换是一种新的“真正”的二维图像表示方法,具有多分辨率、多方向、时频局部和各向异性等特点,在图像处理领域有着广泛的应用前景。但 Contourlet 变换不具有平移不变特性,在某些图像处理领域的应用效果并不是十分理想。无下采样 Contourlet 变换(Nonsampled Contourlet Transform, NSCT)有效地克服了 Contourlet 变换不具有平移不变特性的缺陷,在某些图像处理领域,如图像去噪、数字水印等领域,NSCT 是较 Contourlet 变换更优越的图像表示方法。NSCT 是 2005 年才提出的理论,其理论正趋于完善,应用基本上还处于起步阶段,本文将致力于研究 NSCT 理论及其在 SAR 图像去噪和数字水印上的应用,主要研究内容和研究成果如下:

1. 介绍 Contourlet 变换与 NSCT 的基本理论和实现算法,并对两种变换进行比较。
2. 提出一种基于 NSCT 的合成孔径雷达(SAR)图像去噪方法。在理论上证实了 SAR 图像取对数后 NSCT 系数服从广义高斯分布,从而提出采用贝叶斯阈值方法估计不含噪声的 NSCT 系数,达到去除噪声的目的。仿真和实际实验结果表明,该方法在噪声平滑、边缘和纹理保护等方面优于其他方法且能够有效减少去噪时所引入的人工伪影。
3. 提出一种基于 NSCT 和人类视觉系统(HVS)的自适应数字水印方案,该方案在 NSCT 域中对 HVS 的特性进行建模,利用人眼的视觉掩盖机制自适应嵌入水印序列。实验结果表明,该数字水印方案在保证人眼视觉不可见性的前提下,对包括噪声、JPEG 压缩、图像剪切、滤波、图像扭曲等攻击均具有很强的鲁棒性,并且检测水印时无需原始图像,是一种很有前途的水印方案。

**关键词:** Contourlet 变换; NSCT; SAR; 图像去噪; HVS; 数字水印

## ABSTRACT

Contourlet Transform is a new “true” two-dimensional representation for images, with the characters of multiresolution, directionality and localization. It has a wide application in image processing. But Contourlet transform is not shift-invariant, so it does not perform perfectly in some image processing. Nonsubsampled Contourlet Transform (NSCT) overcomes the shortage of Contourlet Transform, so it outperforms Contourlet Transform in image denoising, digital watermarking etc. NSCT is proposed in 2005, its theory is not perfect, and it is not yet widely used. We will research on the theory of NSCT and its application on SAR image denoising and digital watermarking. The main work and achievements of this thesis are summarized as follows:

1. The basic theory and algorithm of Contourlet Transform and NSCT are introduced, and we make a comparison of this two transforms.
2. We propose a NSCT based despeckling method for Synthetic Aperture Radar (SAR) images, derive in theory that the coefficients of log-transformed SAR images decomposed by NSCT obey general gaussian distribution, so adopt Bayesian shrinkage factor to estimate noise-free NSCT coefficients. Simulation and Experiments demonstrate that the visual quality of the results is excellent than other despeckling methods, in terms of both background smoothing, preservation of edge sharpness and textures. It also can avoid artificial impairments often introduced by critically subsampled transform.
3. We propose a NSCT based adaptive digital watermarking method. This method establish a model of the human visual system (HVS) in NSCT domain, using visual masking effect of HVS to adaptive embed watermarking sequences. Simulation and Experiments demonstrate that the digital watermark not only the transparency can be guaranteed, but also has good robustness to noise additon, JPEG compression, cropping, filtering and image twisting etc. Furthermore, the watermark can be detected without original image. This is a perspective watermarking method.

**Keywords:** Contourlet transform; NSCT; SAR; Image denoising; HVS; Digital watermarking

厦门大学博硕士论文摘要库

## 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 课题研究的目的和意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.3 课题研究内容及论文的组织结构 .....	3
第二章 图像表示方法研究 .....	6
2.1 从傅立叶变换到小波变换 .....	6
2.1.1 傅立叶变换 .....	6
2.1.2 小波变换 .....	7
2.2 图像的多尺度几何分析技术 .....	9
2.2.1 小波变换的不足 .....	9
2.2.2 多尺度几何分析 .....	10
2.3 本章小结 .....	15
第三章 Contourlet 变换和无下采样 Contourlet 变换 .....	16
3.1 Contourlet 变换 .....	16
3.1.1 拉普拉斯金字塔分解 .....	17
3.1.2 方向滤波器组 .....	18
3.2 无下采样 Contourlet 变换 .....	21
3.2.1 无下采样拉普拉斯金字塔分解 .....	21
3.2.2 无下采样方向滤波器组 .....	22
3.2.3 无下采样 Contourlet 变换 .....	23
3.3 本章小结 .....	24
第四章 基于 NSCT 的 SAR 图像去噪 .....	25
4.1 引言 .....	25
4.2 SAR 图像相干斑噪声特征 .....	25
4.2.1 相干斑噪声的形成机理 .....	25
4.2.2 相干斑噪声的数学模型 .....	26
4.2.3 乘性模型下相干斑噪声统计特性 .....	27

4.3 SAR 图像相干斑噪声的抑制方法 .....	27
4.4 基于 NSCT 的 SAR 图像去噪 .....	28
4.4.1 系数模型分析 .....	28
4.4.2 基于 NSCT 的 SAR 图像去噪算法 .....	31
4.4.3 实验结果 .....	32
4.5 本章小结 .....	36
第五章 基于 NSCT 的自适应数字水印 .....	37
5.1 引言 .....	37
5.2 数字水印技术研究 .....	38
5.2.1 数字水印的分类及主要应用领域 .....	38
5.2.3 数字水印的典型算法 .....	40
5.3 人类视觉系统特性 .....	43
5.4 小波域中的视觉特性建模 .....	44
5.4.1 自适应水印嵌入方案 .....	44
5.4.1 水印检测算法 .....	45
5.5 基于 NSCT 的自适应数字水印算法 .....	46
5.5.1 自适应水印嵌入方案 .....	46
5.5.2 水印检测算法 .....	48
5.6 实验结果及讨论 .....	48
5.6.1 水印不可见性测试 .....	48
5.6.2 水印鲁棒性测试 .....	50
5.7 本章小结 .....	53
第六章 总结与展望 .....	54
参考文献 .....	56
攻读学位期间科研工作及发表论文 .....	59
致谢 .....	60



# CONTENTS

<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 The objects and significanies of the study .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 The actuality and achievement at home and abroad .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 The main work and content arrangements of this paper .....</b>	<b>3</b>
<b>Chapter 2 The research on image representation .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 From fourier transform to wavelet transform.....</b>	<b>6</b>
2.1.1 Fourier transform. ....	6
2.1.2 Wavelet transform .....	7
<b>2.2 Image multiresolution geometric analysis.....</b>	<b>9</b>
2.2.1 The shortage of wavelet transform .....	9
2.2.2 Multiresolution geometric analysis .....	10
<b>2.3 Brief summary .....</b>	<b>15</b>
<b>Chapter 3 Contourlet transform and NSCT.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Contourlet transform.....</b>	<b>16</b>
3.1.1 Laplacian pyramid decompose. ....	17
3.1.2 Directional Filter Banks .....	18
<b>3.2 Nonsubsampled contourlet transform.....</b>	<b>21</b>
3.2.1 Nonsubsampled pyramid. ....	21
3.2.2 Nonsubsampled directional filter bank .....	22
3.2.3 Nonsubsampled contourlet transform .....	23
<b>3.3 Brief summary .....</b>	<b>24</b>
<b>Chapter 4 Despeckling SAR images based on NSCT.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 Introduction .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 The characters of speckle noise .....</b>	<b>25</b>
4.2.1 The present reason of speckle noise .....	25
4.2.2 The mathematic model of speckle noise .....	26
4.2.3 The characters of speckle noise under multiplicative model. ....	27
<b>4.3 Methods of Despeckling SAR images .....</b>	<b>27</b>
<b>4.4 Despeckling SAR images based on NSCT .....</b>	<b>28</b>

4.4.1 Analysis of coefficient. . . . .	28
4.4.2 The algorithm of Despeckling SAR images based on NSCT . . . . .	31
4.4.3 Experimental results . . . . .	32
<b>4.5 Brief summary . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>Chapter 5 Adaptive digital watermarking based on NSCT . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>5.1 Introduction . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>5.2 Research on digital watermarking . . . . .</b>	<b>38</b>
5.2.1 The main class of watermarking and its main application . . . . .	38
5.2.3 Representative algorithm of digital watermarking . . . . .	40
<b>5.3 Human visual system . . . . .</b>	<b>43</b>
<b>5.4 HVS model in wavelet domain . . . . .</b>	<b>44</b>
5.4.1 Adaptive embedding method. . . . .	44
5.4.1 Watermark detection . . . . .	45
<b>5.5 Adaptive digital watermarking based on NSCT . . . . .</b>	<b>46</b>
5.5.1 Adaptive embedding method. . . . .	46
5.5.2 Watermark detection . . . . .	48
<b>5.6 Experimental results and discussion . . . . .</b>	<b>48</b>
5.6.1 Transparency tests . . . . .	48
5.6.2 Attack tests . . . . .	50
<b>5.7 Brief summary . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>Chapter 6 Conclusion and expectations . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>References . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>Projects and papers during master study . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>Acknowledgements . . . . .</b>	<b>60</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 课题研究的目的和意义

据统计, 人类获取信息的 80%以上来自视觉, 可见图像是人们主要的信息来源, 这就使得图像处理成为人类获取信息和识别信息最重要的手段之一。而图像信息的有效表示是众多图像处理任务(图像压缩、特征提取、检索、识别、去噪、修复、重建等)的基础。“有效”表示是指能够用很少的系数捕获感兴趣目标重要信息的能力, 即稀疏表示的能力<sup>[1]</sup>。

近年来, 小波变换由于其多分辨率、时频局部等特性, 被广泛应用于图像处理领域<sup>[2][3][4]</sup>。对于一维分段光滑信号, 小波变换是最合适的工具, 因为在某种意义上, 小波能为一维分段光滑信号提供最优表示。然而对于二维图像, 大多信息包含在边缘中, 而小波变换能较好地刻画出由于边缘造成的不连续性, 却无法刻画出边缘本身的连续性, 因此对于二维小波逼近奇异曲线的过程, 最终表现为用“点”来逼近线的过程, 这样当分析尺度变细时, 非零小波系数的数目以指数形式增长, 出现了大量不可忽略的系数, 最终表现为不能“有效”或“稀疏”表示原函数。这一性质直接影响了小波在多种应用中的效果。另外, 在图像处理中, 一般都采用可分离的小波变换核, 它仅具有水平、垂直和对角三个方向, 这与自然图像包含各种方向的边缘不相吻合。可见, 就图像处理中的应用来说小波基并不是表示图像的最优基。

针对小波变换的上述不足, 国外的一些学者提出了多尺度几何分析(Multiresolution Geometric Analysis, MGA)技术, 并成功地提出了多种图像表示方法, 比如1998年 Emmanuel J Candes 提出的 Ridgelet 变换<sup>[5]</sup>、1999年 David Donoho 提出的 Curvelet 变换<sup>[6][7]</sup>、2000年 E Le Pannec 和 Stephane Mallat 提出的 Bandelet 变换<sup>[8]</sup>。2002年 M N.Do 和 Vetterli 提出了一种真正的二维图像表示方法: Contourlet 变换<sup>[9][10]</sup>。Contourlet 变换具有小波变换所具有的多分辨率分析, 时频局部分析的特性, 同时具有小波变换所不具备的高度的方向性和各向异性特性, 是一种更优的图像表示方法, 在许多图像处理领域的性能均优于小波变换<sup>[11][12]</sup>。但 Contourlet 变换不具有平移不变性, 在某些图像处理领域中的效果并不是十分理想<sup>[13]</sup>, 为此 M N.Do 又提出了无下采样的

Contourlet 变换 (NSCT)<sup>[14][15][16]</sup>。NSCT 去掉了 Contourlet 变换中的下采样环节, 是冗余 Contourlet 变换, 它有效地克服了 Contourlet 变换不具有移不变特性的缺陷, 因此在某些图像处理领域, 比如说图像去噪, NSCT 是比 Contourlet 变换更优越的图像表示方法。NSCT 是 2005 年才提出的, 其理论正趋于完善, 应用基本上还处于起步阶段, 无论是理论还是应用仍有许多问题需要解决, 本文即是致力于将 NSCT 运用于图像去噪和数字水印领域, 以期再拓展 NSCT 的应用领域, 具有重要的理论意义和实际应用价值。

## 1.2 国内外研究现状

Contourlet 变换自提出以来就因为其优越的特性而受到研究者的广泛关注, 并被成功应用于图像处理的诸多领域, 比如图像去噪、图像增强、图像压缩、数字水印等等。而 NSCT 由于提出的时间较晚, 相对而言相关理论和应用研究都不是很多, 目前主要集中在图像去噪<sup>[14]</sup>, 图像增强<sup>[15]</sup>, 图像融合<sup>[16]</sup>等领域。

基于 NSCT 的合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 图像去噪方法, 目前都只是采用简单的阈值处理方法, 并没有对 NSCT 的系数进行分析, 因此效果并不是很理想。实验表明, NSCT 系数的概率分布同小波系数的概率分布一样, 都是尖峰, 长拖尾的形状, 明显呈现非高斯特性。在小波域中, 广义高斯分布、混合高斯分布、隐马尔科夫树模型等已成功用于描述这种形状的系数分布, 并取得了比简单阈值去噪方法好很多的去噪效果。因此, 本课题的主要工作之一是对 NSCT 系数进行分析, 提出一种基于 NSCT 的 SAR 图像去噪算法。

在数字水印领域, 目前用的较成功的方法是结合 HVS 特性的水印算法。而目前对 HVS 的视觉特性进行建模主要集中在 DCT 域和小波域中进行。由于小波多分辨率分析与 HVS 对图像信息的处理过程很相似, 因而在小波域中进行 HVS 的视觉特性建模及其应用得到了广泛的研究。文献[17]中在小波域中对 HVS 进行建模, 利用 HVS 中的各种掩盖效应, 自适应地嵌入水印信息, 在嵌入水印量相同的情况下, 获得了更好的视觉效果。NSCT 是一种冗余的二维图像表示方法, 具有多分辨率、时频局部、多方向和各向异性的特性, 较小波变换等与人类视觉系统的信息处理机制更相似, 而有关在 NSCT 变换域中对视觉特性进行建模以及将其运用在数字水印等领域尚未见相关报道。因此, 本课题的另外一项主要工作是在 NSCT 域对人眼视觉特性进行建模并将其应用于图像数字水印领域。

### 1.3 课题研究内容及论文的组织结构

本课题将致力于研究以下两个方面内容：

#### (1) SAR 图像去噪

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种高分辨率成像雷达, 具有全天时、全天候对地球进行观测的能力。然而, 由于后向散射成像特性, SAR 图像不可避免地会受到斑点噪声的影响, 不能正确地反映地面目标的散射特性, 影响了图像的质量, 也给 SAR 图像的后续处理带来困难<sup>[18]</sup>。因此, 抑制图像中的斑点噪声成为了 SAR 图像后处理的前提。

SAR 图像斑点噪声去除方法基本上可以分为多视处理<sup>[19]</sup>, 空间自适应滤波<sup>[20]</sup>, 小波域处理<sup>[21]</sup>三大类。多视处理在抑制斑点噪声的同时降低了图像的分辨率, 空域自适应滤波能够有效地平滑均质区域内的噪声, 但在异质区往往伴随着边缘模糊、纹理损失等缺点。小波由于其优越特性被广泛应用于 SAR 图像去噪。但是, 如前面所述, 常用的二维小波还存在某些不足, 使得小波变换在 SAR 图像去噪处理中表现出一定的局限性, 如伪 Gibbs 效应, 且容易导致图像边缘和纹理信息的一定损失。Contourlet 变换克服了小波变换方向选择性差, 不适宜表示图像边缘、轮廓等线奇异性的结构特征, 理论和实验证明 Contourlet 变换的去噪效果明显优于小波去噪。但 Contourlet 变换不具有平移不变性, 在去噪的同时容易引入一定的人工痕迹。NSCT 则有效地克服了 Contourlet 变换的这一缺陷。

目前国内已经有学者将 NSCT 应用于 SAR 图像去噪领域, 但主要是采用软阈值或硬阈值处理, 或者是假设 SAR 图像取对数后的 NSCT 系数服从高斯分布, 用最大后验概率法 (MAP) 来估计去噪后的 NSCT 系数。他们并没有对 NSCT 系数分布进行深入研究, 根据 SAR 图像取对数完 NSCT 系数的概率分布来选择合适的去噪算法, 因此去噪效果并不是很理想。本课题将致力于研究 SAR 图像取对数完 NSCT 系数的概率分布, 并根据其概率分布提出更加合理的去噪方法。

#### (2) 数字水印

随着数字技术的发展和网络的普及, 数字信息这一丰富的资源日益成为人们生活中不可或缺的部分。在考虑信息获取与交流便捷性的同时, 信息安全、数字媒体的版权保护等问题成为了急待解决的问题, 数字水印技术便是解决这一问题的有效手段之一, 因而得到广泛的关注, 并已成为学术界研究的一个热门领域<sup>[22]</sup>。

数字水印算法主要可分为空域<sup>[23]</sup>和变换域两类,近年来则主要集中在变换域中进行。常用的变换域方法有 DCT 域<sup>[24]</sup>、小波域<sup>[25]</sup>等。数字水印主要应满足两个条件:(1)水印的不可见性,即在原图像的视觉质量不受影响的前提下嵌入水印信息。(2)鲁棒性,即嵌入的水印对各种可能的信号处理和恶意的攻击具有一定抵御能力。近年来,人们发现在变换域中利用人眼视觉系统(Human Visual System,HVS)的各种掩盖效益嵌入水印,能够在不可见性和鲁棒性方面均取得更好的效果。如文献[25]利用小波多分辨率分析与 HVS 对图像信息的处理过程很相似,在小波域中对 HVS 的视觉特性建模并将其应用于数字水印领域,取得很好的效果。文献[26]则利用脊波变换具有的比小波变换更优的方向性,对 HVS 建模并应用于水印嵌入,取得了较优的效果。文献[27]提出一种基于 Contourlet 变换的数字水印方法,嵌入的水印具有很好的鲁棒性,但作者没有利用 HVS 的特性。NSCT 保留 Contourlet 变换的特点,同时克服 Contourlet 变换不具有移不变特性的缺陷,是冗余 Contourlet 变换,相关研究表明,冗余变换对噪声具有较强的鲁棒性<sup>[28]</sup>,而水印可以看成是在一个强背景条件下叠加一个弱噪声,因此 NSCT 域嵌入水印具有一定的优势。所以,在 NSCT 域中对 HVS 建模,并将其运用于水印领域,相比与小波变换、Contourlet 变换更有优势。

到目前为止,还没有人将 NSCT 运用于数字水印,本课题将首次把 NSCT 应用于数字水印,在 NSCT 域中对 HVS 的特性进行建模,利用人眼的视觉掩盖机制自适应地嵌入水印序列。

整篇论文的组织结构如下:

第一章:简要介绍课题研究的目的和意义,分析了该课题国内外的研究现状,对课题主要研究内容: SAR 图像去噪和数字水印进行了分析,最后对论文的组织结构进行了说明。

第二章:叙述从傅立叶变换到小波变换的发展,研究小波变换的原理,分析小波变换在图像处理中的不足,讨论多尺度几何分析的发展现状。

第三章:详细介绍 Contourlet 变换与 NSCT 的基本理论和实现算法,并对两种变换进行比较。

第四章:详细介绍基于 NSCT 的 SAR 图像去噪算法。介绍了 SAR 图像相干斑噪声特征、SAR 相干斑噪声的抑制方法。首次对 SAR 图像取对数完后的 NSCT 系数进行分析,提出采用局部自适应贝叶斯阈值方法来去除噪声,最后通过几组实验来验证算法的优越性。

第五章:详细介绍了基于 NSCT 的自适应数字水印算法。简要介绍了现有的数字水印

技术的主要应用领域及其性能要求，简要介绍了现有的水印技术分类与典型算法。首次提出一种基于 NSCT 的自适应数字水印方案，该方案在 NSCT 域中对 HVS 的特性进行建模，利用人眼的视觉掩盖机制自适应嵌入水印序列。

第六章：对本文的工作进行了总结，并对今后的工作进行了展望。

## 第二章 图像表示方法研究

在变换域图像处理中, 变换对图像表示效率是影响图像处理效果的最重要的因素。近二十年, 小波由于其多分辨率、时频局部等特性在图像处理中取得了广泛的应用, 并取得了很大的成功, 成为继傅立叶分析之后的又一有力分析工具。但是小波变换只有水平、垂直、对角线三个方向, 其方向选择性与实际图像边缘的多样性不相符合, 并且由张量积形成的二维小波通过点奇异性来逼近线奇异, 不能以稀疏的方式表示图像的轮廓及边缘信息。因此, 小波在表示具有点奇异性的函数时是最优基, 但是对于自然图像而言, 小波基并不是最优基。为了避免小波变换的不足, 更加有效地表示和处理图像等高维数据, 研究者们将眼光投向了一门崭新的信号分析工具——多尺度几何分析 (Multiresolution Geometric Analysis, MGA) 技术。

本章简要介绍傅立叶变换、小波变换和各种多尺度几何分析方法的基本原理和特点, 从图像表示方法由傅立叶变换到小波变换再到多尺度几何分析的发展演变过程中更深入理解图像表示方法对于图像处理的重要性, 并给出本文选择 NSCT 进行图像去噪和数字水印研究的原因。

### 2.1 从傅立叶变换到小波变换

#### 2.1.1 傅立叶变换

傅立叶变换 (Fourier transform, FT) 由下列公式定义:

$$\text{正变换: } \mathcal{F}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2-1)$$

$$\text{逆变换: } f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(w)e^{j\omega t} dw \quad (2-2)$$

对于确定信号和平稳随机信号, 傅立叶变换是信号分析和信号处理技术的理论基础, 有着非凡的意义。当今, 傅立叶分析方法已经成为信息科学研究领域不可缺少的重要工具。在变换域分析中, 傅立叶分析始终有着极其广泛的应用, 是研究其他变换方法的基础<sup>[29][30]</sup>。

但是, 由于傅立叶变换的域变换特性,  $f(t)$  和  $\mathcal{F}(w)$  彼此之间是整体刻画, 即傅立叶变换所反映的是整个信号全部时间下的整体频域特征, 而不能提供任何局部时间段



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库